

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОННО-ЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ С ТОКОМ

Г. М. Батанов, А. Е. Петров, А. В. Сапожников,
К. А. Сарксян, Н. Н. Скворцова

УДК 533.951

Приводятся результаты экспериментального исследования ионно-звуковой турбулентности магнитоактивной плазмы, возбужденной дрейфовым током. Обнаружен анизотропный спектр ионно-звуковой турбулентности с максимумом, направленным перпендикулярно току.

Известно [1], что в неизоэнтальной магнитоактивной плазме при наличии продольного электрического тока в результате расщепки ионно-звуковой неустойчивости возбуждаются ионно-звуковые волны с инкрементом

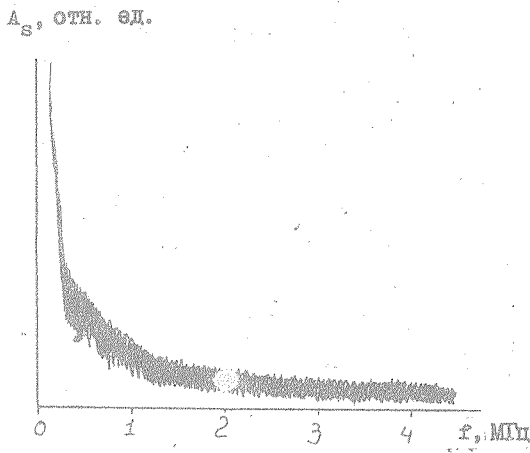
$$\gamma \sim \omega \sqrt{m/M} [(u/v_s) \cos \theta - 1], \quad (1)$$

где ω — звуковая частота, m и M — электронная и ионная массы, u — дрейфовая скорость электронов, v_s — скорость звука, θ — угол между волновым вектором возбуждаемой волны и направлением дрейфовой электронной скорости. Из выражения (1) следует, что если скорость дрейфа превышает звуковую ($u > v_s$), то нарастают ионно-звуковые волны, направление распространения которых лежит внутри конуса с углом $\theta = \arccos(v_s/u)$. В соответствии с (1), при $u > v_s$ имеет место почти изотропное возбуждение ионно-звуковых волн, а при $u \geq v_s$ волны возбуждаются вдоль направления дрейфового тока. Подобные угловые распределения неустойчивых ионно-звуковых волн наблюдались в ряде работ (см., например, [2,3]). Однако в работе [4] наблюдалось выделенное, поперечное к дрейфовому току распространение звуковых

волн в магнитоактивной плазме для случая $u \gg v_s$ /4/. Возможность существования анизотропных спектров ионно-звуковой турбулентности с максимумом, не совпадающим с направлением тока для немагнитической плазмы, была показана в /5/.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты об аномальном распределении по волновым векторам ионно-звуковой турбулентности, возбуждаемой дрейфовым током электронов в замагнитической плазме.

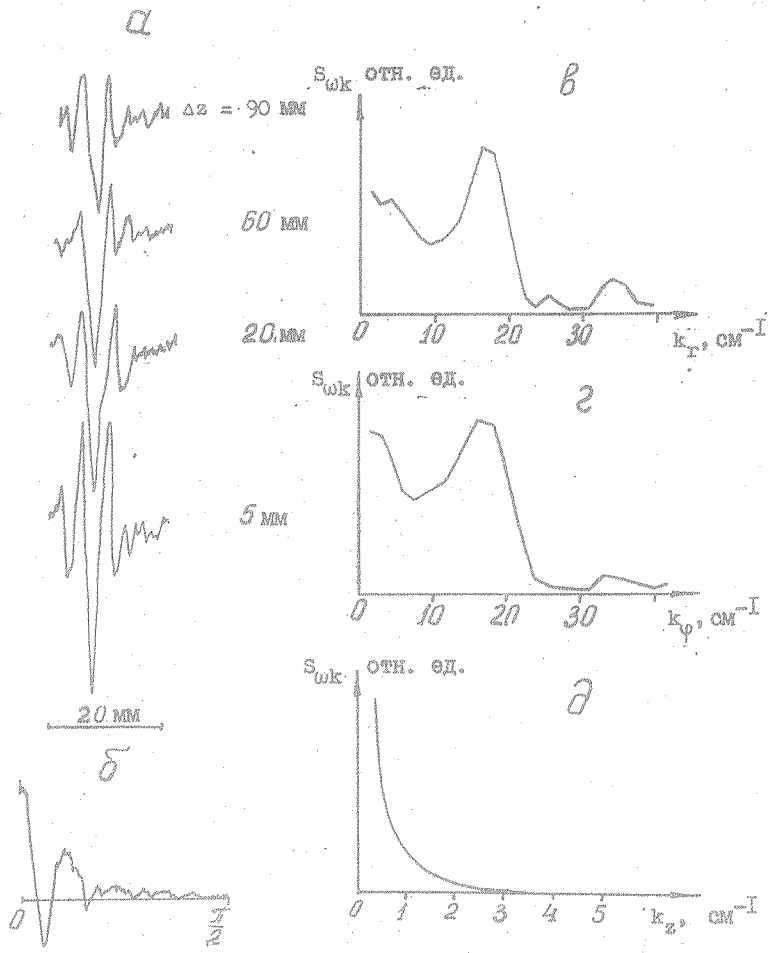
Исследования проводились в аргонной плазменном столбе диаметром 4 см и длиной 100 см, в магнитном поле $H = 600$ Э /6/. Концентрация плазмы $n \approx 10^{10}$ см⁻³, температура электронов $T_e = 2 + 4$ эВ, плазма неизохорическая с температурой ионов $T_i \approx 0,7 T_e$. В плазме регистрировался низкочастотный (НЧ) сплошной спадающий спектр плазменных колебаний, простиравшийся до ионной ленгмювской частоты. Спектр НЧ колебаний плазмы представлен на рис. 1. Наличие в плазме дрейфового тока электронов /7/ с дрейфовой скоростью $u = (1 - 2) \cdot 10^7$ см/с $\gg v_s$ указывает на ионно-звуковую природу регистрируемых волн.



Р и с. 1. Частотный спектр НЧ колебаний. Амплитуда спектра A_s дана в линейном масштабе

Идентификация НЧ колебаний по дисперсионной зависимости частоты колебаний f от волнового числа k и исследование спектров волновых чисел проводились с использованием метода корреляционного анализа /8/. Сигналы с двух пространственно разделенных зондов после преобразования частоты и усиления подавались на коррелометр, результирующая корреляционная функция записывалась на двухкоординатном самописце. В настоящей работе измерялась взаимно корреляционная функция (ВКФ) с двух пространственно разделенных зондов с выделением из шумового спектра плазменных колебаний сигнала на фиксированной частоте. ВКФ получалась при перемножении сигналов с двух зондов и выделения постоянной составляющей при усреднении во времени и характеризует пространственное распределение фаз волн. Спектры колебаний по составляющим волновых векторов вычислялись путем Фурье-анализа пространственной ВКФ по соответствующей координате для сигнала на выделенной частоте. Полный ωk -спектр можно получить, проводя измерения на различных частотах.

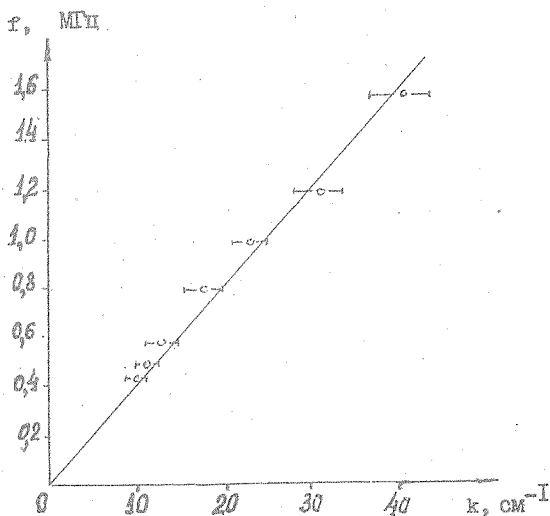
Измерения пространственных ВКФ проводились по трем координатам: радиальной (r), азимутальной (φ) и продольной (z). Измерение ВКФ по z требует выставления зондов на одной магнитной силовой линии, в связи с чем снижалась радиальная ВКФ для различных расстояний вдоль z между зондами (рис. 2а). Период ВКФ соответствует распространяющейся волне, и поэтому из вида ВКФ по различным координатам можно определить составляющие волнового вектора k_x , k_φ , k_z . На рис. 2а,б приведены коррелограммы для сигналов на частоте $f = 7$ МГц по радиальной координате для различных расстояний между зондами и азимутальной координате. Результаты Фурье-анализа пространственных ВКФ представлены на рис. 2в,г,д. В спектре плотности энергии звуковых волн по радиальной составляющей волнового вектора для каждой выделенной частоты f существует максимум, приходящийся на определенное значение k_x ($\Delta k_x < k_x$). Эта величина k_x соответствует периоду радиальной пространственной ВКФ; для частоты $f = 7$ МГц $k_x = 17 \text{ см}^{-1}$ и $\lambda_x = 3,5 \text{ мм}$ (рис. 2а,в). В спектре по азимутальной составляющей для фиксированной частоты f также существует максимум при определенном k_φ ($\Delta k_\varphi < k_\varphi$), соответствующий периоду азимутальной ВКФ; для $f = 7$ МГц $k_\varphi = 17 \text{ см}^{-1}$, рис. 2 (б,г). Как видно из серии коррелограмм рис. 2а, вдоль магнитного поля ВКФ



Р и с. 2. Коррелограммы НЧ волн на частоте $f = 1 \text{ МГц}$ по радиальной координате при различных расстояниях вдоль магнитного поля (а) и по азимутальной координате (б). Спектры по радиальной (в), азимутальной (г) и продольной (д), составляющим волновых векторов для волн на частоте 1 МГц

меняется слабо. Спектр плотности энергии волн по продольной составляющей для частоты 1 МГц (рис. 2д) монотонно падает с увеличением k_z , при этом средняя величина $k_z \approx 0,6 \text{ см}^{-1}$. В отличие от спектров по k_x и k_y , относительная ширина спектров по продольной составляющей велика ($\Delta k_z \approx k_z$), т.е. для фиксированной частоты спектр продольных составляющих волновых векторов широкий.

По результатам измерений составляющих волновых векторов были вычислены значения полных волновых векторов ($k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$), соответствующих различным фиксированным частотам из сплошного НЧ спектра, и была построена зависимость частоты волны от полного волнового числа $f(k)$ (рис. 3). Этот график отвечает закону дисперсии ионно-звуковых волн $f = kv_s/2\pi$. Определенная из наклона прямой фазовая скорость звуковых волн $v_s \approx (2 - 3) \cdot 10^5 \text{ см/с}$ совпадает со звуковой скоростью, вычисленной из прямых измерений температуры электронов ($v_s = (T_e/M)^{1/2}$, $T_e = 2 + 4 \text{ эВ}$).



Р и с. 3. Дисперсионная зависимость НЧ волн

В исследуемой плазме дрейфовым потоком возбуждается ионно-звуковая турбулентность со сплошным спектром и характерной дисперсией ионного звука. Фазовая скорость возбуждаемых волн много меньше дрейфовой скорости электронов: $u \gg v_s$. Из пространственных ВКФ по трем координатам и из сравнения спектров плотности энергии звуковых волн по различным компонентам волнового вектора следует, что для исследуемых НЧ волн $k_{\perp} \gg k_z$. Т.е. звук возбуждается почти перпендикулярно дрейфовому току ($\theta \approx 88^\circ$), в то время как из (1) можно было бы ожидать изотропного возбуждения ионно-звуковых волн. Наконец отметим, что отношение величин продольной и поперечной составляющих волновых векторов $k_z/k_{\perp} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ оказывается близким к отношению фазовой скорости звука к дрейфовой скорости электронов $v_s/u \approx (1 - \beta) \cdot 10^{-2}$.

Таким образом, полученные в эксперименте результаты указывают на аномальное анизотропное возбуждение ионно-звуковой турбулентности в замагниченной плазме в направлении поперек тока. Наблюдаемое угловое распределение может быть связано с нелинейными или квазилинейными процессами установления стационарной турбулентности /9, 10/.

Поступила в редакцию
30 апреля 1982 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. Л. Гинзбург, А. А. Рухадзе, Волны в магнитоактивной плазме, "Наука", М., 1970 г., с. 146-147.
2. R. Z. Stenzel, Phys. Fluids, 21, 99 (1978).
3. D. B. Ilić, Phys. Fluids, 20, 1717 (1977).
4. W. Gekelman, R. L. Stenzel, Phys. Fluids, 21, 2014 (1978).
5. В. Ю. Быченко, В. П. Силин, ДАН СССР, № 5, 26, 1090, (1981).
6. Ф. Ф. Асадуллин и др., Физика плазмы, 4, № 5, 1104 (1978).
7. А. В. Сапожников, Препринт ФИАН № 166, М., 1979 г.
8. Г. М. Батанов и др., Препринт ФИАН № 169, М., 1981 г.
9. A. S. Sakharov, S. Kuhn, Preprint FIAN N 100, М., 1982.
10. В. Ю. Быченко, В. П. Силин, Краткие сообщения по физике ФИАН № 12, 62 (1981).